УДК 681.511.4

Н.В. Гудкова[1], В.М. Чуйков[2]
[1]Таганрогский технологический институт Южного федерального университета
Россия, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44,
[2]НКБ цифровой обработки сигналов Южного федерального университета
Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2

Эффективный метод управления упругомассовыми электромеханическими системами повышенной сложности

N.V. Gudkova[1], V.M. Chuykov[2]
[1]Taganrog Institute of Technology, Southern Federal University
Russian Federation, 347928, Taganrog, Nekrasovsky st., 44,
[2]SFedU Research and Design Bureau of Digital Signal Processing of Southern Federal University
Russian Federation, 347922, Taganrog, Shevchenko st., 2

Effective Control Method of Advanced Electromechanical Mass-Elastic Systems

Н.В. Гудкова[1], В.М. Чуйков[2]
Таганрозький технологічний інститут Південного федерального університету
Росія, 347928, м. Таганрог, пров. Некрасовський, 44
НКБ цифрової обробки сигналів Південного федерального університету
Росія, 347922, м. Таганрог, вул. Шевченка, 2

Ефективний метод керування пружномасовими електромеханічними системами підвищеної складності

Проведен анализ и выявлены особенности управления многомассовыми электромеханическими системами с упругими связями. Рассмотрен метод синтеза регуляторов систем автоматического управления (САУ), обеспечивающий желаемые показатели качества переходных процессов в системах управления динамическими объектами. Показано, что параметры регулятора могут быть определены из соотношений, полученных путем минимизации отклонения переходного процесса в синтезируемой системе от желаемого. Выполнено компьютерное моделирование системы, представлены его результаты, подтверждающие эффективность рассматриваемого метода.
Ключевые слова: управление, многомассовые системы, упругие связи, желаемые показатели качества, динамические объекты.

In the issue, analytical treatment of the peculiarities of multi-mass electromechanical systems with elastic linkages is revealed. The procedure of automatic control system (ACS) controller synthesis provided the desired quality index of transient processes in the dynamic object control system is considered. It is pointed out that controller parameters can be defined from relations, derived by transients deviation minimization of synthetic systems from required. Computer simulation of the above mentioned system was done, the results of which validate the efficiency of the considered method.
Key words: advanced, multi-mass systems, elastic linkages, desired quality indexes, dynamic objects.

Проведений аналіз і виявлені особливості керування багатомасовими електромеханічними системами з пружними зв’язками. Розглянутий метод синтезу регуляторів систем автоматичного керування, який гарантує бажані показники якості перехідних процесів у системах керування динамічними об’єктами.

Показано, що параметри регулятора можуть бути визначені зі співвідношень, отримуваних шляхом мінімізації відхилення перехідного процесу в синтезованій системі від бажаного. Виконане комп'ютерне моделювання системи, представлені його результати, що підтверджують ефективність розглядуваного методу.
Ключові слова: керування, багатомасові системи, пружні зв'язки, бажані показники якості, динамічні об'єкти.

Введение

Сложные многомассовые электромеханические системы (ЭМС) – электроприводы (ЭП), включающие силовой преобразователь, электродвигатель, механическую передачу и рабочий орган исполнительного механизма, широко используются в современном энергетическом оборудовании.

В процессе работы САУ все элементы механических звеньев ЭМС, являющейся объектом управления (ОУ), находятся под воздействием усилий и моментов и в той или иной степени деформируются, что приводит к появлению колебаний в упругой системе, которые влияют на переходные процессы в электродвигателе и оказывают воздействие на его скорость, ток, момент, что, в свою очередь, снижает точность воспроизведения заданных перемещений рабочих органов. Детальный анализ такой многомассовой упругой системы является довольно сложной процедурой и требует учета динамики каждой массы и каждой связи.

Проведенные в [1] исследования показали, что если учитывать наибольшие массы и наименее жесткие связи, то для большинства практических приложений достаточно в качестве математической модели ОУ использовать модель «двигатель – двухмассовый механизм».

В такой модели можно с достаточной для инженерной практики точностью учитывать смещение центра масс нагрузок, моменты инерции навесного оборудования, электрические параметры электродвигателя и др.

Обобщенная структурная схема ОУ «двигатель – двухмассовый механизм» показана на рис. 1.

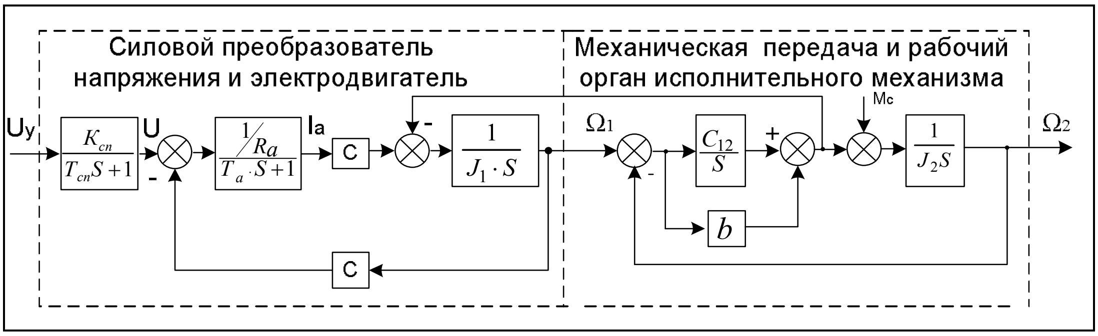


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема
объекта управления «двигатель – двухмассовый механизм»

В схеме использованы следующие обозначения величин и параметров: U_y, U – управляющее и выходное напряжение силового преобразователя напряжения; I_a – ток якорной цепи электродвигателя; Ω_1 и Ω_2 – угловые скорости валов электродвигателя и рабочего органа; M_c – момент нагрузки, $K_{\text{сп}}$ и $T_{\text{сп}}$ – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя, $R_{\text{а}}$ и $T_{\text{а}}$ – активное сопротивление и постоянная времени якорной цепи, C – конструктивная постоянная двигателя, J_1 и J_2 – моменты инерции ротора двигателя и рабочего органа соответственно, C_{12} и b – приведенный коэффициент жесткости и коэффициент внутреннего вязкого трения кинематической передачи.

Данное структурное описание может быть преобразовано (без учета пренебрежимо малой постоянной времени силового преобразователя) к передаточной функции ОУ, в которой выходом является измеряемая угловая скорость рабочего органа:

$$W_{\text{оу}}(p)=\frac{\Omega_2(p)}{\text{U}_\text{у}(p)}=\frac{b_1p+b_0}{p^4+d_3p^3+d_2p^2+d_1p^1+d_0}. \quad (1)$$

Анализ структурной схемы и передаточной функции ОУ показывает, что здесь имеет место взаимное влияние друг на друга механической и электрической части устройства, т.е. упругие колебания в механической части системы приводят к возникновению колебательных режимов в самом электроприводе, что существенно усложняет управление объектом. В этой связи синтез систем управления упругомассовыми объектами представляет собой нетривиальную задачу.

В настоящее время для ее решения используются различные способы синтеза регуляторов [2]. Наиболее развитым и законченным методом, по мнению многих авторов, является модальное управление.

Этот метод позволяет получить желаемые динамические свойства системы путем формирования стандартных характеристических полиномов, распределение корней которых связано со временем переходного процесса, перерегулированием, статической точностью. В результате удается синтезировать регуляторы, которые в общем случае сводятся к организации безынерционных и динамических звеньев в контурах обратной связи.

Однако этот способ достаточно громоздок и требует в каждом конкретном случае, тем более для такой непростой модели, как система «двигатель – двухмассовый механизм», специального анализа, дополнительных кропотливых математических выкладок и времени, что не всегда удобно.

Целью данной работы является попытка использования для синтеза упругомассовых систем достаточно простого и физически прозрачного метода [3], который обеспечивает требуемые характеристики переходных процессов и, на наш взгляд, может активно применяться в инженерной практике.

Сущность метода заключается в синтезе САУ с заданными показателями качества, к которым относятся требуемый запас устойчивости системы, допустимое время регулирования, допустимая величина перерегулирования, допустимые величины ошибок в установившихся режимах (статическая ошибка, ошибки по скорости, ускорению и др.).

Принято считать, что САУ обладает желаемым качеством, если ее показатели качества не превышают допустимых значений.

Реализация метода в общем случае заключается в выполнении следующей последовательности действий.

1. Выбирается тип регулятора, обеспечивающий требуемый порядок астатизма для заданной САУ.

2. Составляется структурная схема синтезируемой САУ и находится ее передаточная функция:

$$W_3(p)=\frac{B(p)}{A(p)}.$$

3. Записывается изображение по Лапласу $X(p)$ переходной характеристики этой системы $x(t)$, в коэффициенты которого A_i и B_i входят искомые параметры регулятора:

$$X(p)=W_3(p)\cdot\frac{1}{p}=\frac{B(p)}{A(p)}\cdot\frac{1}{p}=\frac{B_0+B_1p+\ldots+B_np^n}{A_0+A_1p+\ldots+A_np^n}\cdot\frac{1}{p} \qquad (A_n\neq 0). \quad (2)$$

4. Задаются допустимые значения параметров перерегулирования σ и времени регулирования $t_р$ и соответствующая им желаемая переходная характеристика $x^*(t)$ в виде ее изображения по Лапласу:

$$X^*(p) = W^*(p)\cdot\frac{1}{p} = \frac{\beta(p)}{\alpha(p)}\cdot\frac{1}{p} = \frac{\beta_0+\beta_1 p+\ldots+\beta_m p^m}{\alpha_0+\alpha_1 p+\ldots+\alpha_m p^m}\cdot\frac{1}{p}\quad(\alpha_m\neq 0), \tag{3}$$

где $W^*(p)$ – передаточная функция эталонной системы, выбор конкретных параметров α_i и β_i которой обеспечивает требуемые свойства желаемой переходной характеристики $x^*(t)$.

5. Рассчитываются параметры регулятора по соотношениям, полученным путем минимизации отклонения переходного процесса синтезируемой системы от желаемого.

Величина отклонения синтезируемого процесса от желаемого $\varepsilon(t) = x(t) - x^*(t)$ оценивается с помощью соотношения:

$$\frac{\varepsilon(p)}{X^*(p)} = \frac{X(p)-X^*(p)}{X^*(p)} = \frac{D_0+D_1(p)+\ldots+D_n(p)}{F_0+F_1p+\ldots+F_np^n} = \sum_{j=0}^{\infty} R_j p^j, \tag{4}$$

где $R_0 = \frac{D_0}{F_0}$; $R_i = \frac{D_i - \sum_{k=0}^{j-1} R_k F_{j-k}}{F_0} (j = 1,2,3,\ldots)$.

Соотношению (4) во временной области соответствует ряд:

$$\varepsilon(t) = R_0 x^*(t) + R_1\frac{dx^*(t)}{dt} + R_2\frac{d^2x^*(t)}{dt^2} + \ldots \tag{5}$$

Приравняв нулю первые r коэффициентов R_i, получим систему r уравнений, из которой можно определить r параметров регулятора. Число искомых параметров выбирается из условия обеспечения заданной точности воспроизведения желаемого процесса $x^*(t)$ в синтезируемой системе.

С учетом вышесказанного, можно показать, что система уравнений для определения параметров регулятора принимает вид:

$$\begin{cases} \alpha_0 B_0 - \beta_0 A_0 = 0; \\ (\alpha_0 B_1 + \alpha_1 B_0) - (\beta_1 A_0 + \beta_0 A_1) = 0; \\ (\alpha_0 B_2 + \alpha_1 B_1 + \alpha_2 B_0) - (\beta_0 A_2 + \beta_1 A_1 + \beta_2 A_0) = 0; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ (\alpha_0 B_{r-1} + \alpha_1 B_{r-2} + \ldots + \alpha_{r-1} B_0) - (\beta_0 A_{r-1} + \beta_1 A_{r-2} + \ldots + \beta_{r-1} A_0) = 0. \end{cases} \tag{6}$$

После решения уравнений (6) при необходимости оценивается устойчивость САУ с синтезированным регулятором (например, с помощью критерия Гурвица) и выполняется компьютерное моделирование переходных процессов в системе при различных воздействиях с целью проверки ее эффективности в смысле обеспечения требуемого качества управления.

Практический опыт использования данного метода показал, что вполне приемлемые для инженерного применения результаты могут быть получены при выборе эталонной модели в виде системы второго порядка с передаточной функцией:

$$W^*(p) = \frac{\beta_0 + \beta_1 p}{\alpha_0 + \alpha_1 p + \alpha_2 p^2}. \tag{7}$$

Этот выбор обусловлен тем, что динамика многих САУ более высокого порядка достаточно близка к динамике системы второго порядка. В то же время для такой системы существует однозначная связь между ее параметрами α_0, α_1, α_2, β_0, β_1, и показателями качества [2].

Как показала практика, для создания многих сложных автоматических систем, в том числе систем с упругими свойствами достаточно использовать набор типовых регуляторов (П, ПИ, ПИД и др.).

Эффективность предлагаемого метода демонстрируется на примере компьютерного моделирования процедуры синтеза САУ упругомассовым объектом, структурная схема которого показана на рис. 1, где численные значения параметров равны [1]: $K_{сп} = 22$; $T_{сп} = 0{,}0033$ с; $R_а = 0{,}177$ Ом; $T_а = 0{,}02$ с; С = 0,976 Вб; $J_1 = 0{,}11$ кг-м^2; $J_2 = 0{,}56$ кг-м^2; $C_{12} = 14$ Н м/рад; $b = 0{,}22$ Н м с/рад.

В этом случае передаточная функция ОУ (1) принимает вид:

$$W_{оу}(p) = \frac{21663\,p + 1378531}{p^4 + 52.4\,p^3 + 2718.2\,p^2 + 8574.7\,p^1 + 61157}. \tag{8}$$

Моделирование выполнялось в среде Matlab с помощью специально разработанных для этой цели программных модулей, которые осуществляют процедуру синтеза выбранных законов управления, рассчитывают переходные процессы в нерегулируемом объекте, в эталонной модели и синтезированной САУ с графическим выводом полученных данных.

При моделировании ставилась задача синтеза САУ с астатизмом первого порядка, поэтому для данного объекта был выбран И-регулятор. В качестве желаемой характеристики использовалась переходная функция инерционного звена первого порядка с постоянной времени, равной 1,3 С.

Результаты синтеза системы отражены на рис. 2, из которого видно, что переходная характеристика $x(t)$ синтезированной САУ близка к желаемой монотонной характеристике $x^*(t)$, в то время как нормированная переходная характеристика в нерегулируемом ОУ $x_н(t)$ носит характер затухающих колебаний, максимальная амплитуда которых достигает величины 1,38 от ее установившегося значения.

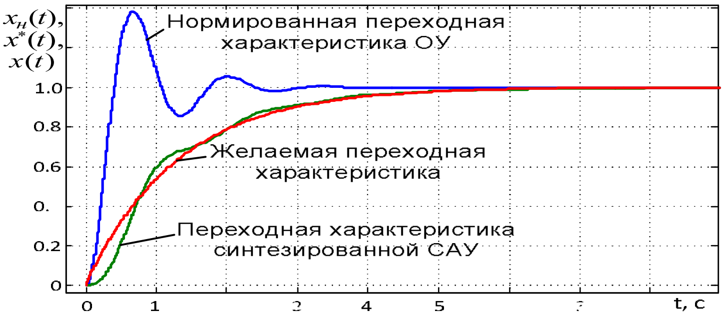


Рисунок 2 – Результаты синтеза двухмассовой САУ

Анализ проведенных экспериментов показал, что в общем случае выбранный регулятор можно использовать для подавления колебаний в упругомассовых системах при приемлемых требованиях к быстродействию САУ.

Выводы

Полученные в работе результаты позволяют сделать выводы о том, что предложенный метод можно эффективно использовать для синтеза регуляторов сложных

электромеханических систем, а алгоритмическая простота метода позволяет автоматизировать процедуру синтеза систем управления для объектов и регуляторов различного вида с помощью универсальных компьютерных программ.

Литература

1. Борцов Ю.А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – СПб. : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 1992.
2. Гудкова Н.В. Синтез упругомассовых систем управления по желаемой переходной характеристике / Н.В. Гудкова, В.М. Чуйков // Современная электроника. – 2011. – № 3. – С. 72-77.
3. Смольников Л.П. Расчет систем управления / Смольников Л.П., Бычков Ю.А., Гудкова Н.В. – Л. : Энергия, 1979.

Literatura

1. Bortsov Y.A.. Avtomatizirovannyi electroprivod s uprugimi svyazyami. SPb.:Energoatomizdat. Sankt-Peterburg, otd-nie. 1992.
2. GudkovaN.V. Sovremennaya elektronika. 2011. № 3. S. 72-77.
3. Smolnikov L.P. Raschet system upravleniya. L.: Energiya. 1979.

RESUME

N.V. Gudkova, V.M. Chuykov

Effective Control Method of Advanced Electromechanical Mass-Elastic Systems

In the issue, analytical treatment of the peculiarities of multi-mass electromechanical systems with elastic linkages is revealed. The attempt to use simple and physically-transparent method of multi-mass systems control on required parameters is taken.

It is cleared out that use of the suggested method for automatic control system (ACS) controller synthesis provides the desired quality index of transient processes in the dynamic object control system, notably, required stability factor of the system, allowed control time, allowed overcorrection quantity, permissible values of errors in steady-state conditions (statistical error, range-rate error, acceleration error, etc.).

It is pointed out that controller parameters can be defined from relations derived by transient processes deviation minimization of synthetic systems from required.

On the base of controller parameters calculation of the dual-mass electromechanical object control system the synthesis procedure implementation method is described. The results of computer simulation of the above mentioned system, which validate the efficiency of the considered method and availability of its application in engineering experience, are given.

Статья поступила в редакцию 31.05.2012.